

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.004

新建地铁近距离施工对既有车站结构 沉降变形的影响分析

陈向红

(中核大地生态科技有限公司,北京 100013)

摘要:为了解决新建地铁近距离施工引起既有车站结构的变形问题,以北京新建首都机场线北新桥地铁下穿邻近既有地铁5号线北新桥站工程为研究对象,基于 Wrapper 方法和机器学习模型,对影响既有结构变形的围岩变形模量、覆土厚度、施工工序、新建与既有结构的水平及竖向距离等5个因素的影响水平进行了预测分析;并通过有限元法与现场实测结果比较验证了模型方法的可靠性。最后,针对新建外挂厅、地铁区间不同设计距离下的既有车站结构变形进行计算及分析。结果表明:外挂厅施工易诱发结构短期回弹后趋于稳定,新建地铁区间则易导致持续累积性沉降;0~5 m 距离范围为“强扰动区”,新建施工对既有车站结构的变形耦合效应明显,5~15 m 为变形“快速衰减区”,施工扰动向既有结构荷载传递作用增强,15 m 以上为“衰减稳定区”,施工扰动处于既有车站结构的变形影响阈值外。

关键词:既有车站;近距离施工;Wrapper-机器学习;沉降变形;有限元分析

中图分类号:U231.4

文献标识码:A

文章编号:1672-1144(2026)01-0033-08

Analysis of the Influence of Close Construction of New Subway on the Structural Settlement Deformation of Existing Station

CHEN Xianghong

(CNNC Geological Dadi Ecological Technology Co., Ltd., Beijing 100013, China)

Abstract: This paper takes the Beixinqiao subway station on the new Capital Airport Line in Beijing as a research object, in order to solve the deformation problem of the existing station structure caused by the construction of the new subway line. Using the Wrapper method and machine learning models, this work analyzed the influence levels of the five factors affecting the deformation of the existing structure, including the deformation modulus of the surrounding rock, the thickness of the overburden soil, the construction process, the horizontal and vertical distances between the new and existing structures. The model's reliability is verified by comparing its results with those of the finite element method and field measurements. Finally, the structural deformation of the existing station under different design distances of the new external hall and subway section was constructed and analyzed. The results show that construction of the external hall stabilizes the structure quickly after short-term rebound, whereas the new subway section leads to continuous, cumulative settlement. The 0~5 m distance range is the 'strong disturbance area', where the coupling effect of deformation caused by the new construction on the existing station structure is obvious. The 5~15 m range is the 'rapid attenuation area' of deformation, where the load transfer effect of construction disturbance on the existing structure is enhanced. Above 15 m, the construction disturbance is outside the deformation influence threshold of the existing station structure, forming the 'attenuation stability area'.

Keywords: existing stations; adjacent construction; wrapper-machine learning; settlement deformation; finite element analysis

收稿日期:2025-10-07

修稿日期:2025-11-18

基金项目:中核铀业全国重点实验室青年基金项目(NKLUR-2024-QN-019)

作者简介:陈向红(1977—),男,博士,正高级工程师,主要从事岩土工程、地下工程等领域的研究工作。E-mail:06115214@bjtu.edu.cn

城市轨道交通是国家城市发展的重要工程,依据《2024 中国城市地下空间发展蓝皮书》,截至 2023 年底,城市轨道交通运营线路总长度 11 225 km,其中地铁运营线路总长度 8 543 km,占比 76%,运营里程全球第一。但考虑城市土地资源紧张,城市轨道交通线路正呈现“立体交叉式”发展趋势。新建地下工程邻近既有结构施工面临技术难度大^[1]、变形控制严格^[2-3]、致险因素多^[4]、风险等级高^[5-7]等工程问题,因此,开展地铁邻近施工条件下既有结构变形研究是当前一项重要课题。

国内外学者围绕地铁隧道建设问题进行了大量的理论研究,主要研究方法包括解析法、试验法、数值模拟法。陶连金等^[8-10]运用变位分配原理,对地铁 10 号线公主坟站密贴下穿既有地铁 1 号线工程既有站结构变形的主要原因进行了分析,并将数值模拟结果与实际监测数据进行了对比分析。模拟模型试验^[11-13]、现场原位试验^[14]、离心试验^[15]等模型试验分析方法作为地下工程领域应用极为广泛的高效模拟技术,孟令志^[16]针对新建地铁穿越工程“超前深孔注浆+六导洞 PBA+边桩顶升”沉降控制体系下的既有隧道沉降规律进行了研究;Kim 等^[17]建立缩尺模型,围绕新建盾构隧道密贴施工对既有隧道衬砌结构的影响机制进行了试验分析;Boonyarak 等^[18]则通过三维离心试验,研究了盾构隧道开挖引起既有隧道变形的影响范围。近年来,随着计算机技术与数值计算软件的不断发展,地下工程领域的耦合分析研究取得了诸多进展,借助数值分析软件解决实际工程问题逐渐成为行业常态^[19-22]。其中,杜文等^[23]、高太平等^[24]、郭宏博等^[25]、梁尔斌^[26]多位学者分别以城市地铁穿越项目为背景,对不同新建地下工程密贴既有地铁施工的影响问题进行了研究;张小伟等^[27]、彭丽云等^[28]则分别针对密贴基坑开挖支护结构、既有地面建筑的变形问题进行了方案比选。此外,考虑密贴既有结构的施工安全问题,有学者从工前检测^[29]、工前评估^[30-31]、工中动态控制及工后评价多个方面入手^[32],建立新建地下工程密贴穿越既有建筑结构的安全风险评估体系,并将成果应用于实际工程建设中。

综上所述,现有研究成果多基于特定方法开展工程分析,针对密贴距离参数的影响问题研究较少。考虑穿越工程本身的复杂性,涉及的影响因素较多,本文以北京新建首都机场线北新桥地铁下穿邻近既

有地铁 5 号线北新桥站工程为背景,首先基于 Wrapper 方法和机器学习模型,针对影响既有地铁车站结构的主要参数进行特征分析,接着运用有限元软件建立整体模型,并与现场实测结果进行比较验证,最后对不同参数条件下的既有车站结构变形进行分析,以期为类似工程提供借鉴。

1 工程概况

1.1 新建地铁与既有车站位置关系

以新建首都机场线北新桥地铁下穿邻近既有地铁 5 号线北新桥站工程为研究对象,新建外挂厅基坑长约 80 m、宽 30 m,结构底板深 27 m,采用地下连续墙支护。外挂厅南侧横通道顶板埋深 10 m,结构长约 8 m、宽 18 m、高 15 m。既有地铁 5 号线北新桥站主体结构长约 170 m、宽 22 m、高 13 m,纵向柱距 8.0 m。外挂厅与既有车站水平净距为 25.4 m,竖向净距为 9.3 m;新建车站与既有车站的水平净距为 22.3 m,竖向净距为 8.9 m,暗挖区间段断面宽度 18.5 m,高约 10 m。

新建地铁区间、外挂厅与既有车站的位置关系如图 1 所示。

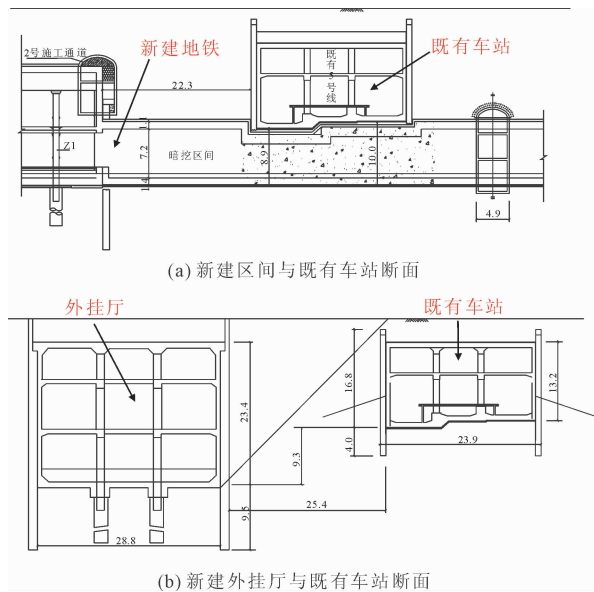


图 1 新建地铁与既有车站位置关系图

1.2 地质条件

工程研究区位于永定河冲洪积扇中部,砂卵石层与粉土、黏土类地层交互沉积,根据钻探资料与室内土工试验结果,研究范围内地层由上向下主要分布为填土、粉质黏土、砂土、卵石。地层主要参数如表 1 所示。

表 1 土层主要物理力学参数表

土层	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	变形模量 /MPa	泊松 比	黏聚力 /kPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
填土	1600	8	0.30	5	12
粉质黏土	1850	10	0.35	25	15
砂土	2000	35	0.30	0	30
卵石	2100	86	0.28	0	35

1.3 监测点布设

新建地铁下穿邻近既有车站结构施工变形控制严格,车站结构变形监测点布设于车站结构上,综合运用几何水准测量与静力水准远程自动化监测方法。图 2 为监测点平面布置图。在车站范围内监测点按 10~20 m 间距布设,为便于比较,本文选取左线 ZX03—ZX14 的变形监测数据进行分析,新建地铁施工荷载步的关键监测节点时间如表 2 所示。

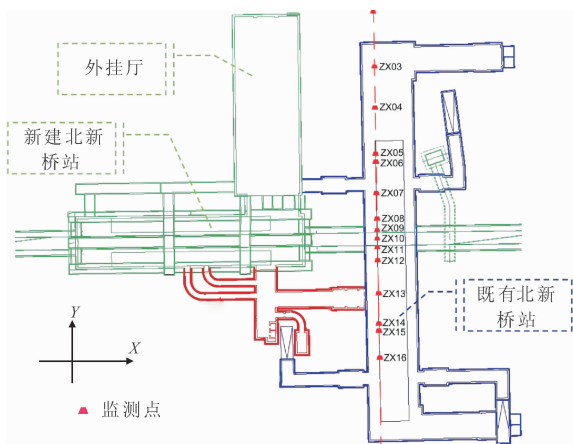


图 2 监测点布置图

表 2 关键监测进度统计表

序号	节点时间(年-月-日)	施工进度
0	2016-09-07	监测点布设完成及初始值采集
1	2017-08-25	外挂厅土方开挖完成
2	2019-02-15	PBA 导洞开挖完成
3	2020-06-10	二衬施工完成
4	2021-11-02	地铁施工完成后 1 年

2 基于 Wrapper - 机器学习模型既有车站变形关键影响参数特征

2.1 基本理论

为便于工程分析,本文将基于 Wrapper 特征筛选方法^[33]对预测结果进行影响因素相关性分析,采用极限学习单隐层反馈神经网络模型^[34]作为机器学习预测模型。极限学习网络模型可用数学表达式表示为:

$$\sum_{i=1}^m \beta_i g(w_i \times x_i + b_i) = o_j, j = 1, 2, \dots, K \quad (1)$$

式中: $g(\cdot)$ 为隐藏层的激活函数; $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ia}]^T$ 为输入层样本; $w_i = [w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{ai}]$ 为连接输入层节点与第 i 隐藏层节点的输入权值向量; b_i 为第 i 层隐藏层节点的阈值; $\beta_i = [\beta_{i1}, \beta_{i2}, \dots, \beta_{ic}]^T$ 为连接第 i 隐藏层节点与输出层节点的输出权值向量; $o_j = [o_{j1}, o_{j2}, \dots, o_{jc}]^T$ 为网络输出值; K 为样本总数;脚标 a, c 分别为网络输入层和输出层的节点数。

极限学习的代价函数 G 与其最小值 $\min(G(S, \beta))$ 可表示为:

$$G(S, \beta) = \sum_{j=1}^k |o_j - t_j| \quad (2)$$

$$\min(G(S, \beta)) = \min_{w_i, b_i, \beta} \|H(w_1, \dots, w_m, b_1, \dots, b_m, x_1, \dots, x_k)\beta - h\| \quad (3)$$

$$H(w_1, \dots, w_m, b_1, \dots, b_m, x_1, \dots, x_k) = \begin{bmatrix} g(w_1 x_1 + b_1) \cdots g(w_m x_1 + b_m) \\ \vdots \\ g(w_1 x_k + b_1) \cdots g(w_m x_k + b_m) \end{bmatrix}_{k \times m} \quad (4)$$

$$\beta = \begin{bmatrix} \beta_1^T \\ \vdots \\ \beta_m^T \end{bmatrix}_{m \times k}, \quad h = \begin{bmatrix} t_1^T \\ \vdots \\ t_k^T \end{bmatrix}_{k \times k} \quad (5)$$

式中: $G(\cdot)$ 为衡量网络输出值与目标值之间的偏差函数; $S = (w_i, b_i, i = 1, 2, \dots, m)$ 为包含网络输入权值及隐藏层节点阈值; t 为目标值; H 为网络关于样本的隐藏层输出矩阵; β 为输出权值矩阵; h 为样本集目标值矩阵;下标 m 为隐藏层节点数。

2.2 特征分析

结合现场实测数据(见表 3),基于 Wrapper 特征筛选与机器学习预测模型,对影响既有车站结构变形的 5 个主要因素(水平距离、竖向距离、围岩变形模量、覆土厚度和施工工序)进行相关性分析。其中,采用 Wrapper 特征筛选法开展预测结果的影响因素相关性分析:在模型训练过程中,通过随机剔除单个特征并实施袋外误差分析,依据特征剔除后预测误差的幅值量化其重要性,预测误差增幅越大,对应特征的贡献度与重要性越高,反之则越低。同时,选择机器学习预测模型为极限学习机(Extreme Learning Machine, ELM): ELM 具备操作便捷、学习效率、泛化能力强的技术优势,作为一种单隐层反馈神经网络,该算法仅需预设隐层节点数量,其输入

权值与阈值可随机初始化且无需迭代寻优,既大幅节省了参数调优的时间成本,又能确保模型收敛至唯一最优解。预测结果如图 3 所示。

表 3 现场实测数据 单位:mm

监测点	时间序号				
	0	1	2	3	4
ZX03	0.15	0.35	0.10	0.00	0.05
ZX04	-0.20	0.40	-0.25	-0.45	-1.30
ZX05	0.05	0.00	0.00	-0.15	-1.05
ZX06	-0.05	0.40	-0.05	-0.95	-1.40
ZX07	-0.15	0.45	0.15	-0.75	-1.80
ZX08	-0.05	0.35	-0.15	-0.95	-1.75
ZX09	0.00	0.35	-0.20	-1.00	-0.85
ZX10	0.15	0.00	0.45	-0.75	-0.80
ZX11	0.00	0.05	-0.10	-0.10	-0.15
ZX12	0.00	-0.05	0.00	-0.50	-0.55
ZX13	-0.30	0.30	-0.20	-0.20	-0.20
ZX14	-0.15	-0.15	-0.05	0.05	-0.15

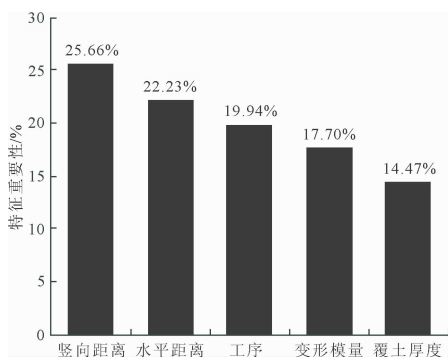


图 3 因素相关性预测结果

由图 3 分析可知,在本项目中,新建地铁与既有车站的水平与竖向空间分布特征对预测结果的贡献度显著,是既有车站变形的主要影响因素。考虑既有车站自身的结构参数及外部环境条件具有较高确定性,如何科学合理优化新建工程的空间布局方案,是开展本项目研究的初衷。

下文将重点围绕新建地铁区间、外挂厅与既有车站间的距离影响问题展开讨论,分析不同距离条件下的结构变形规律。需要指出的是,既有车站的上覆土层厚度和变形模量,因在本项目的距离-变形问题研究中为非关键变量,故将不作为本论文研究内容,相关参数将参考工程实际勘察数据进行取值,以确保研究结论的针对性。

3 有限元分析

3.1 有限元建模

选用有限元软件 ANSYS 进行建模模拟,整体模

型如图 4 所示,模型坐标 x 、 y 、 z 分别对应新建地铁掘进方向、既有车站纵向和地层深度方向,考虑边界效应,地下结构距离边界的尺寸取 3 倍的结构宽度^[35-37],对应坐标方向模型尺寸 140 m × 180 m × 80 m。模型顶底板和侧墙采用板壳单元,柱采用梁单元;围岩采用结构实体单元,采用 M-C 本构关系,计算参数如表 1 所示。模型边界条件为:沿 x 和 y 方向边界均限制水平位移,底部边界约束竖向位移。为便于比较分析,载荷步与实际关键监测节点时间相一致,计算时分别按外挂厅施工、地铁横通道施工(PBA 导洞施工)、地铁区间下穿施工、车站及附属结构施工等 4 个载荷步模拟施工进度,利用软件提供的单元“生死”功能实现对开挖的动态施工过程模拟,在模拟中固定侧墙对应节点的水平位移或竖向位移,模拟车站及附属结构对侧墙的强约束效果。图 4 示出了整体结构有限元计算模型。

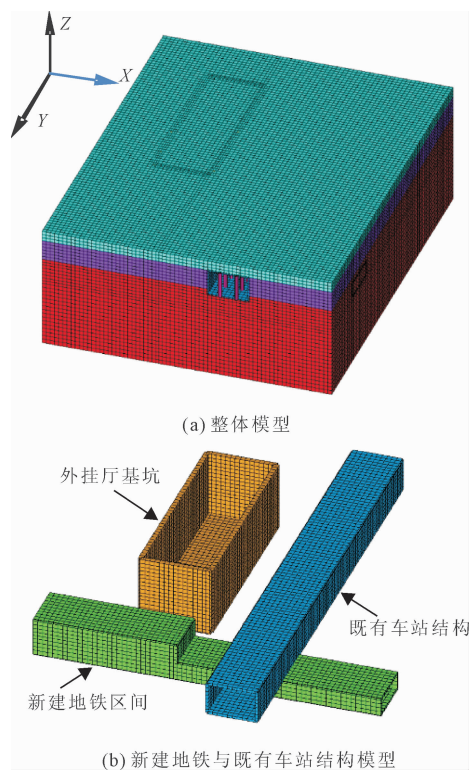


图 4 有限元计算模型

3.2 比较及验证

3.2.1 新建地铁施工引起既有车站的变形分析

为考察新建地铁近距离施工对既有车站结构变形的影响,验证有限元模型理论计算结果的可靠性,选取第 1(外挂厅施工)和第 3(新建地铁区间施工)典型荷载步,各监测点(ZX03—ZX14)竖向位移实测值与有限元模型对应节点的理论值比较结果如图

5 所示。

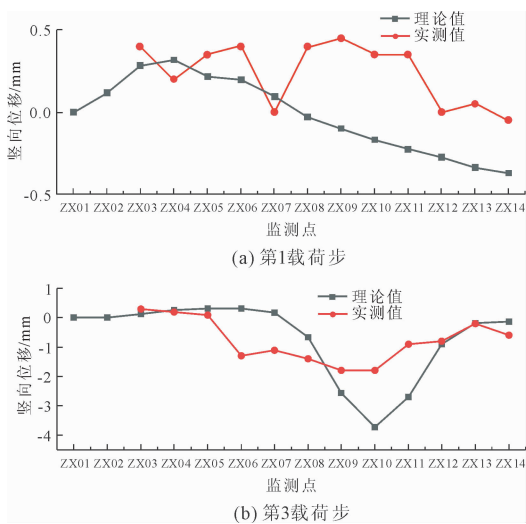


图 5 监测点竖向位移理论与实测值比较

由图 5 中沿既有车站纵向各监测点的位移曲线清晰看出,既有车站监测点位置在“零距离”暗挖区间段上方时,沉降变形的理论值与实测值存在较大的差异^[38-39],第 1 载荷步,相差约 0.6 mm,第 3 载荷步则达到了 1.9 mm;ZX03—ZX08、ZX12—ZX14 监测点理论计算值与现场实测值相吻合,ZX09—ZX11 理论计算值与现场实测值存在显著偏离。出现差异的原因是隧道下穿区间段施工中,为保障既有车站结构安全采取了注浆等临时加固手段^[40-41],注浆的抬升作用改变了实际变形状态,导致模拟数据与监测数据出现较大差异,故其变形曲线波动小,同实际情况相比有较大差异。但两者总体变化趋势基本一致,由此验证了本研究中有限元分析方法的可靠性与适用性。

分析图 5(a) 中的竖向位移曲线可知,外挂厅施工引起邻近既有车站监测点的隆起变形,距离外挂厅较远的监测点则以沉降变形为主。其原因可归结为:外挂厅基坑土体在开挖后出现回弹,导致基坑影响范围内的车站结构发生局部隆起,最大隆起量发生在近临外挂厅的 ZX04 监测点处。由图 5(b) 进一步分析可知,由于有限元法在建模时对岩土材料的理想化模拟,以及模型分析未考虑实际施工过程中采取的局部注浆加固、施作临时钢支撑等支护条件,有限元计算沉降曲线相比实测曲线表现出更为标准的“V”型凹槽状,最大沉降值发生在新建地铁区间轴线与既有车站的交叉位置(ZX10)。

3.2.2 随载荷步监测点的变化规律

为考察监测点变形随载荷步的变化规律,选择

具有代表性的 6 处监测点(ZX04、ZX08、ZX09、ZX10、ZX11 和 ZX12),对其理论值与实测值进行比较,如图 6 所示。

从图 6 的曲线特征分析可知,既有车站不同监测点的竖向位移随荷载施加进程呈现显著差异化规律。结合监测点的空间分布特点,可归纳为两种典型变形响应机制:以 ZX04 监测点为代表,其变形特征表现为外挂厅土方开挖阶段率先出现回弹变形,随着后续施工工序推进,回弹量逐步衰减,并在施工后期趋于稳定;ZX08—ZX12 监测点的变形规律与 ZX04 存在明显差异,全程以沉降变形为主,尽管在初期外挂厅和 PBA 导洞施工阶段有小幅回弹,但整体随载荷步呈现持续沉降趋势,最大沉降变形发生在新建地铁区间下穿施工荷载阶段,是变形控制的关键风险点。

上述差异化变形特征表明:新建外挂厅与地铁区间施工对既有车站结构的变形影响机制存在本质区别。

3.3 因素分析

3.3.1 地铁区间下穿距离的影响分析

为系统探讨新建地铁下穿施工对既有车站结构变形的影响机制,本次研究通过仅改变新建地铁区间施工深度,并按 5 m 间隔设置间距梯度(即新建区间与既有车站结构的竖向净距分别选取 0、5、10、15、20、25 m),构建 6 种工况建模进行比较分析。

图 7 与图 8 分别示出了既有车站结构变形随新建地铁区间下穿距离的变化规律。由图 7 可以清晰看出,随新建地铁区间下穿距离增加,沿既有车站纵向的竖向位移呈现“隆起弱化、沉降强化”的特征:隆起变形的峰值高度与范围逐步收窄,而沉降变形的深度与影响区间持续扩展,尤其在 ZX10 监测断面位置,沉降槽的形态由“窄深型”向“宽缓型”演化,反映出深部施工扰动的传递效应随距离增加而扩散。

从图 8 进一步量化的“隆起-沉降”位移差曲线可以看出:当竖向净距从 0 增至 5 m 时,既有车站结构最大位移差呈快速增长趋势,这与近距离施工引发的围岩剧烈卸荷、应力集中释放直接相关;当净距超过 5 m 后,差值快速衰减,围岩的“卸荷拱效应”随空间距离增加而降低,结构受扰动程度逐步减小;当净距达到 15 m 及以上,位移差趋于稳定,此时施工扰动已处于既有车站结构的变形影响阈值外,围岩应力重分布对结构变形的作用进入稳态。

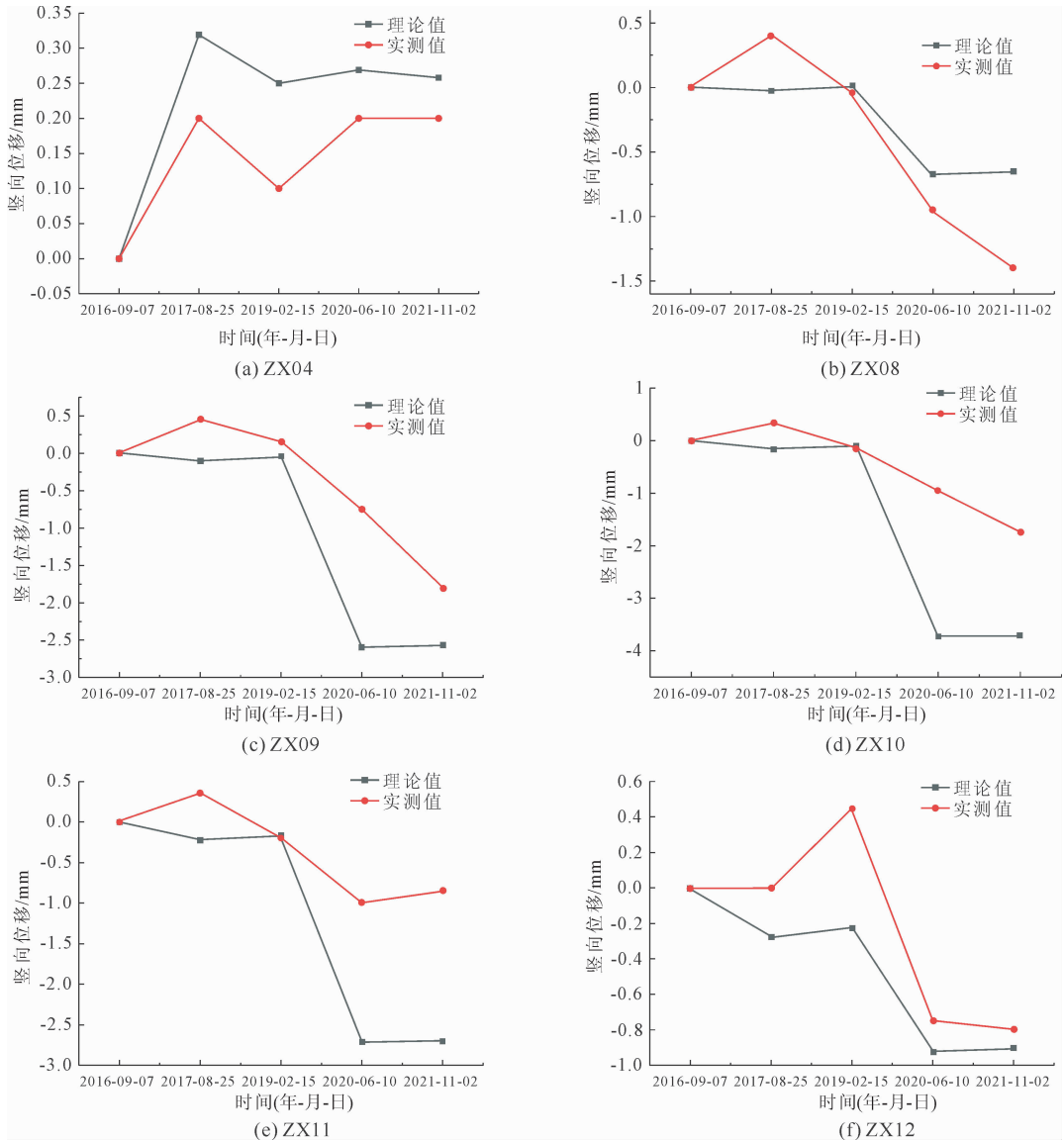


图 6 随载荷步监测点竖向位移理论与实测值比较

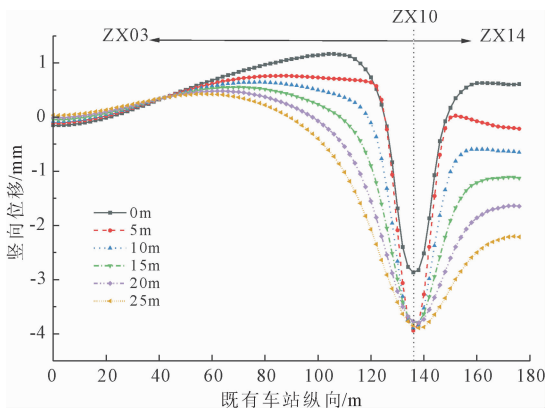


图 7 不同竖向距离既有车站纵向竖向位移的分布曲线

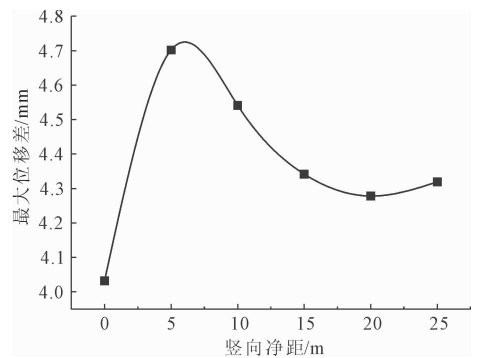


图 8 随竖向距离既有车站最大位移差的变化规律

3.3.2 外挂厅近距离施工的影响分析

本次研究通过仅改变新建外挂厅与既有车站的

距离,同理按 5 m 间隔设置间距梯度(即新建外挂厅与既有车站结构的水平净距分别选取 0、5、10、15、20、25 m),构建 6 种工况建模进行比较分析。

图 9 与图 10 分别示出了既有车站结构竖向位

移随新建外挂厅施工距离的变化规律。从图 9 中可清晰观察到,随着新建外挂厅与既有车站水平距离的增大,沿既有车站纵向的竖向位移呈现出如下特征:隆起量逐步减小,沉降虽有一定程度增加,但整体位移差呈持续衰减趋势;且外挂厅施工距离对“隆起-沉降”变形的空间形态(峰值高度、作用区间)未产生显著影响。表明两者的变形耦合效应更多受“基础应力传递路径”控制,而非单纯的距离线性影响。

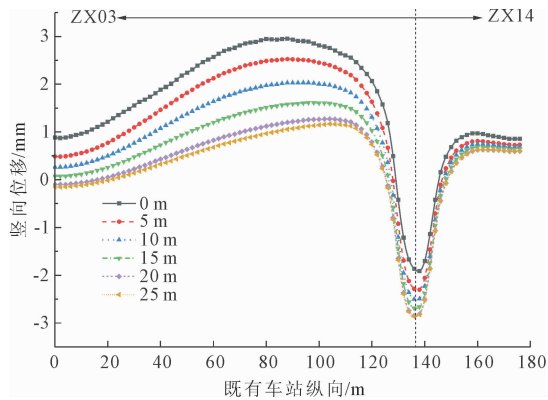


图 9 不同水平距离既有车站纵向竖向位移的分布曲线

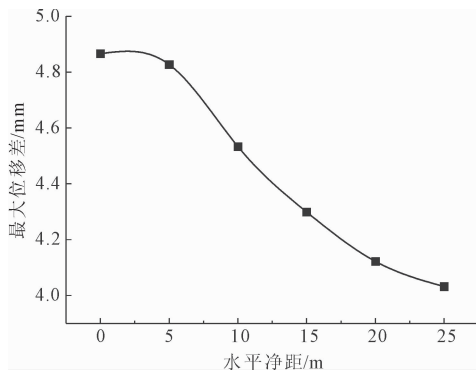


图 10 随水平距离既有车站最大位移差的变化规律

从图 10 进一步量化的位移差曲线可以看出:既有车站结构最大位移差随外挂厅距离增加呈“阶梯式衰减”特征,在 0~5 m 近距区间,位移差衰减速率较为平缓,外挂厅施工与既有车站结构之间的耦合效应较强,应力传递路径短、损耗少,位移差衰减缓慢;当间距大于 5 m 后,施工扰动在围岩中的应力传递路径延长,能量耗散,既有车站结构受到的扰动影响降低,位移差随之快速衰减;待距离进一步增大至 15 m 以上,位移差衰减趋势逐步趋于平缓,结构响应进入衰减稳定区,此时施工扰动已降至既有结构的变形敏感阈值以下,应力重分布对结构变形的影响基本稳定。

4 结 论

针对北京新建首都机场线北新桥地铁下穿、邻近既有地铁 5 号线北新桥站工程,首先,基于 Wrapper 方法和机器学习模型分析了影响既有车站结构变形的关键因素;接着,运用 ANSYS 有限软件建立整体模型,并结合现场实测数据对既有车站结构随载荷步的变形规律进行了分析;最后针对外挂厅施工距离和新建地铁区间下穿距离的影响机制问题进行深入讨论。主要结论如下:

(1) 通过对影响既有地铁车站结构变形的主要参数进行特征分析,得出:外挂厅和新建地铁施工的空间分布特征(与既有车站的距离参数)是影响既有车站结构变形的主要因素。

(2) 运用有限元法进行模拟分析,通过与实测结果比较显示:有限元模拟能够准确反映既有车站结构竖向位移曲线的变化趋势,验证了该模拟方法的可靠性。

(3) 外挂厅开挖与新建地铁区间下穿对既有车站变形影响机制不同:前者短期回弹后稳定,后者易致持续沉降。随两者与既有车站净距增大,围岩应力传递、变形耦合效应及变形差异度均降低。5 m 内为强扰动区需重点管控,5~15 m 为快速衰减区可优化工艺,15 m 以上变形风险低。

(4) 在该类工程的支护方案设计与施工管控中,需针对外挂厅与新建区间两种施工工况的变形风险特点采取差异化措施,依据实时监测数据动态调控施工参数,确保既有车站结构安全。

参考文献:

- [1] 陶连金,李积栋,汪国峰. CRD + 顶撑控制技术在密贴下穿工程中的应用[J]. 铁道工程学报,2013,30(7): 74-79.
- [2] 王晓锋. 超大直径盾构下穿地下管线的变形及其安全控制研究[J]. 水利与建筑工程学报,2014,12(1): 169-173.
- [3] 刘建美,刘洋. 地铁隧道近距离下穿既有地铁站变形规律和安全控制研究[J]. 水利与建筑工程学报,2016,14(6):202-207,212.
- [4] 李骥. PBA 工法地铁车站密贴下穿既有车站工程风险控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2016:6-8.
- [5] 陶连金,刘春晓,许有俊,等. 密贴下穿地下工程研究现状及发展趋势[J]. 北京工业大学学报,2016,42(10):1482-1489.
- [6] Luo Zhenhua, Zeng Li, Pan Haize, et al. Research on construction safety risk assessment of new subway station close-attached undercrossing the existing operating station [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019:

- 3215219.
- [7] Zhou Zihan, Zhou Xiaohan, Li Longping, et al. The construction methods and control mechanisms for subway station undercrossing an existing tunnel at zero distance[J]. *Applied Sciences*, 2023,13(15):8826.
- [8] 李积栋,陶连金,王国峰,等. 变位分配原理在地铁密贴穿越工程中的应用[J]. *铁道科学与工程学报*, 2013,10(4):68-75.
- [9] 李积栋,陶连金,安军海,等. 新建大跨度地铁车站密贴下穿既有车站结构变形分析[J]. *现代隧道技术*, 2014,51(S1):107-113.
- [10] 陶连金,安军海,边金,等. 密贴下穿地下工程施工新工艺 CRD + 多重顶撑研究[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2015,42(1):97-103.
- [11] 俞涛. 地铁盾构隧道近接施工影响的数值模拟及模型试验研究[D]. 成都:西南交通大学,2005:76-110.
- [12] 李围,何川,张志强. 大型地下结构下修建盾构隧道模型试验[J]. *西南交通大学学报*, 2005(4):478-483.
- [13] 汪洋,何川,曾东洋,等. 盾构隧道正交下穿施工对既有隧道影响的模型试验与数值模拟[J]. *铁道学报*, 2010,32(2):79-85.
- [14] 方勇,符亚鹏,周超月,等. 公路隧道下穿双层采空区开挖过程模型试验[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014,33(11):2247-2257.
- [15] 金大龙,袁大军,韦家昕,等. 小净距隧道群下穿既有运营隧道离心模型试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2018,40(8):1507-1514.
- [16] 孟令志. 大断面平顶直墙车站密贴下传既有有线风险控制技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2017:81-115.
- [17] Kim S H, Burd H J, Milligan G W E. Model testing of closely spaced tunnels in clay[J]. *Geotechnique*, 1998,48(3):375-388.
- [18] Boonyarak T, Ng C W W. Three-dimensional influence zone of new tunnel excavation crossing underneath existing tunnel[J]. *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 2016,42(2):1513-1518.
- [19] 何川,苏宗贤,曾东洋. 地铁盾构隧道重叠下穿施工对上方已建隧道的影响[J]. *土木工程学报*, 2008,41(3):91-98.
- [20] 房明,刘镇,周翠英,等. 新建隧道盾构下穿施工对既有隧道影响的三维数值模拟[J]. *铁道科学与工程学报*, 2011,8(1):67-72.
- [21] 李平,杨挺,刘汉龙,等. 基坑开挖中既有下穿地铁隧道隆起变形分析[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2011,12(5):480-485.
- [22] 韩焯,刘赅炜, Jamie R Standing. 隧道下穿既有线的案例分析与沉降分析方法[J]. *土木工程学报*, 2012,45(1):134-141.
- [23] 杜文,王永红,李利,等. 双层车站密贴下穿既有隧道案例分析及隧道沉降变形特征[J]. *岩土力学*, 2019,40(7):2765-2773.
- [24] 高太平,闫建龙,申健昊,等. 四线隧道密贴下穿既有车站施工参数优化分析[J]. *铁道标准设计*, 2020,64(9):95-102.
- [25] 郭宏博,仇文革,牛晓宇,等. 新建通道密贴下穿地铁车站施工影响范围研究[J]. *土木工程学报*, 2021,54(S1):113-120.
- [26] 梁尔斌. 隧道密贴下穿既有车站变形缝沉降控制研究[J]. *现代隧道技术*, 2022,59(2):182-191.
- [27] 张小伟,张丽,韩亚飞,等. 大断面平顶地铁暗挖车站下穿既有建筑方案研究及变形控制——以北京地铁 8 号线三期前门站工程为例[J]. *隧道建设(中英文)*, 2021,41(6):979-987.
- [28] 彭丽云,朱同宇,李焱,等. 密贴既有线路基的双基坑开挖支护参数优化[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2022,36(3):237-245.
- [29] 梅文胜,陈雪丰,周小波,等. 盾构下穿既有隧道实时监测及其风险控制研究[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2011,36(8):923-927.
- [30] 曹成勇,施成华,彭立敏,等. 浅埋大跨下穿高速公路隧道施工风险评估及控制措施研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2016,13(7):1439-1446.
- [31] 郑余朝,周贤舜,李俊松. 盾构隧道下穿高速铁路站场安全风险评估管理方法[J]. *地下空间与工程学报*, 2018,14(2):523-529,557.
- [32] 牛晓凯,张顶立,高西洋,等. 地铁车站顺行密贴下穿既有隧道安全风险评估[J]. *北京交通大学学报*, 2018,42(3):95-102.
- [33] Kahavi R, John G. Wrapper for feature subset selection[J]. *Artificial Intelligence*, 1997,97(1-2):273-324.
- [34] 甘露. 极限学习机的研究与应用[D]. 西安:西安电子科技大学,2014:17-35.
- [35] 苏晓莹. 隧道开挖数值模拟的围岩边界取值范围研究[J]. *铁道工程学报*, 2012,29(3):64-68.
- [36] 袁松,王峥峥,周佳媚. 隧道地震动力计算边界取值范围研究[J]. *土木工程学报*, 2012,45(11):166-172.
- [37] 高攀,李文杰. 隧道相似模型中试验边界尺寸选取的探讨[J]. *低温建筑技术*, 2019,41(1):81-85.
- [38] 万良勇,宋战平,曲建生,等. 新建地铁隧道“零距离”下穿既有车站施工技术分析[J]. *现代隧道技术*, 2015,52(1):168-176,183.
- [39] 宋战平,王凯蒙,王涛,等. 浅埋地铁隧道下穿高速公路施工方法比选[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2019,51(4):503-510,596.
- [40] 马明明,姬永生. 新建隧道下穿施工对既有高速公路的影响及工法优化研究[J]. *公路工程*, 2020,45(1):140-145.
- [41] 黄大维,胡新平,耿大新,等. 盾构下穿既有隧道诱发沉降后注浆抬升试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2025,47(11):2255-2263.